압출 가공 wick-free plate가 적용된 다중효용확산 태양열 증류기의 성능 실험

이가람¹ · 임병주² · 최석민³ · 박창대^{4†}

¹과학기술연합대학원대학교 플랜트기계공학과, 박사과정

한국기계연구원 에너지기계연구본부 플랜트융합연구실, 학생연구원

²한국기계연구원 에너지기계연구본부 플랜트융합연구실, 책임연구원

³한국기계연구원 에너지기계연구본부 플랜트융합연구실, 선임연구원

⁴과학기술연합대학원대학교 플랜트기계공학과, 교수

한국기계연구원 에너지기계연구본부 플랜트융합연구실, 책임연구원

Performance Experiment of Multi-Effect Diffusion Distiller with Extruded Wick-Free Plate

Lee Ga-Ram¹ · Lim Byung-Ju² · Choi Seok-Min³ · Park Chang-Dae^{4†}

¹Ph.D. Candidate, Department of Plant system and machinery, University of Science & Technology
Researcher, Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials

²Principal Researcher, Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials

³Senior Researcher, Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials

⁴Professor, Department of Plant system and machinery, University of Science & Technology

Principal Researcher, Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials

†Corresponding author: parkcdae@kimm.re.kr

Abstract

We have developed a wick-free plate (WFP) in which a groove pattern is applied to the surface of a plate to replace the wick-plate, which is a key component of a multi-effect diffusion distiller (MEDD). Wicks and plates act as an evaporation surface and a condensation surface, respectively, in MEDD. However, the wick-plate structure has several problems, such as laborious manufacturing processes and lower durability. Therefore, in this study, WFPs were manufactured using the extrusion method, and MEDD with WFPs was experimentally evaluated. The extrusion method had a lower processing cost and better corrosion-resistance surface than the etching process that was employed in our previous study. The extruded WFP could lower the manufacturing cost by 77% compared to the etched WFP, and had the advantage of absorbing more solar radiation energy by lowering the installation inclination angle by 10°. After fabricating the triple-effect MEDD with the extruded WFPs, an indoor performance experiment was conducted. The results of the solar thermal performance test indicated that WFP-MEDD at 11.7 MJ/(m² · d) of thermal energy produced 3% higher freshwater than the existing MEDD with a wick-plate.

Keywords: 태양에너지(Solar energy), 증류(Distillation), 태양열 증류기(Solar still), 다중효용확산(Multi-effect diffusion), 압출(Extrusion)

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.41, No.1, pp.1-11, February 2021
<https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.1.001>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 7 October 2020

Revised: 10 December 2020

Accepted: 21 December 2020

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기호설명

a	: 정확도
CSS	: 전통적인 수조형 태양열 증류기(Conventional Solar Still)
h_{latent}	: 증발잠열(kJ/kg·°C)
I	: 전류
m	: 담수생산량(kg)
MEDD	: 다중효용확산 태양열증류기(Multi-effect diffusion distiller)
PR	: 성능 지수(Performance ratio)
Q	: 공급열량(kJ)
u	: 표준불확도
u_c	: 합성표준불확도
V	: 전압
WFP	: Wick-free plate
WFP-MEDD	: Wick-free plate가 적용된 MEDD
WP	: Wick-plate
WP-MEDD	: Wick-plate가 적용된 MEDD

1. 서론

지구에는 약 14억 km³의 물이 있지만, 이 중 약 2.5%인 3,500 만 km³이 담수이며 그 중 지하수가 1,100만 km³, 우리가 쉽게 접근 가능한 지표수는 10만 5천 km³ 밖에 되지 않는다¹⁾. 그러나 수자원이 한정되어 있음에도 경제 성장과 인구증가로 인한 물 사용량의 증가(연간 1%)²⁾와 수질 오염, 지구온난화 및 기후변화 심화 등에 의해 전 세계적으로 물 부족 문제는 계속 심화되고 있다. 이에 따라 안정적인 수자원 확보를 위한 해결책으로 해수 담수화 기술이 주목 받게 되었다. 대표적인 해수담수화 기술에는 역삼투압법, 다중효용법, 다단증발법 등이 있다. 그러나 이 기술들은 대용량의 담수를 생산하는 데에 더 적합하기 때문에 대부분 일일 만 톤 이상의 중대형 플랜트로 건설된다. 이에 따라 도서 산간 지역이나 오지, 개발도상국과 같이 전기와 물 기반의 인프라가 부족한 곳이나 인구수가 적은 지역에 적용되기 어렵다. 이러한 지역에는 신재생에너지를 이용한 소용량의 해수담수장치를 사용하는 것이 적절하다.

전통적인 수조형 태양열 증류기(CSS, Conventional Solar Still)는 담수 생산량이 5 kg/(m²·d) 미만으로 낮다^{3,4)}. 이러한 낮은 생산성을 향상시키기 위해 Telkes⁵⁾는 다중효용확산형 태양열 증류기(MEDD, Multi-Effect Diffusion Distiller)를 개발하였다. MEDD는 수직으로 평행하게 설치된 효용단 사이 온도차에 의해 담수를 생

산한다. 각 효용단은 평판(plate)과 워크(Wick)으로 구성된다. 여기서 워크는 평판에 부착된 흡습성을 가진 물질로, 해수를 평판 전면에 균일하게 퍼뜨리고, 천천히 흘러내려 충분한 증발면적과 증발시간을 확보하는 역할을 한다. Fig. 1(a)는 워크-평판(WP, Wick-plate) MEDD의 개략도를 보여준다. 태양복사에너지가 첫 번째 평판으로 흡수되면 평판의 반대면에 부착된 워크에 흐르는 해수가 가열된다. 이 때, 해수가 증발하고 확산되어 다음 효용단의 평판에서 응축되며, 응축 시 발생한 응축잠열이 다음 효용단의 열원이 된다. 이러한 증발-확산-응축 과정이 마지막 효용단까지 반복되면서 생산량 및 생산효율을 증대시킨다. Telkes 이후 많은 연구자들이 다양한 형태의 MEDD를 개발해 왔으며, MEDD의 생산량은 $15-37.6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 으로 CSS보다 3-7.5배 많은 양의 담수를 생산할 수 있다⁶⁻¹⁰⁾.

하지만 워크는 주로 천 재질을 사용하는데 평판의 열변형, 부착 공정의 오류, 워크의 노화 등에 의해 평판으로부터 종종 탈락하게 되며, 사용수명이 평판에 비해 상대적으로 짧다^{11,12)}. 워크의 탈락은 생산수의 오염과 워크와 평판 사이의 접촉열저항 증가를 초래하여 생산수의 품질과 양을 저하시킨다. 또한 워크와 평판의 부착공정은 제작 시간 및 비용을 증가시킨다. 이를 해결하기 위해서는 Fig. 1(b)와 같이 구조가 단순하여 제작 효율성 및 담수 신뢰성이 뛰어난 WP를 사용하지 않는 MEDD를 개발하여야 한다. 본 연구팀은 MEDD의 핵심 부품인 WP를 대체하기 위해 에칭(Etching)가공에 의해 금속평판의 표면에 반복되는 홈 패턴을 적용한 일체형 금속판인 wick-free plate (WFP)를 개발한 바 있다¹³⁾. 그러나 에칭 가공법은 다른 가공법에 비해 비싸고, 식각된 표면의 내식성이 좋지 않으며, 가공 면적의 한계가 있기 때문에 상용화가 어렵다는 단점이 있었다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구¹³⁾를 통해 얻은 홈 최적 형상의 치수를 적용하면서, 제작 단가 및 성능(내식성, 설치경사도, 생산량 등)을 개선할 수 있도록 홈의 형상 및 가공법을 변경하여 새로운 WFP를 만들었다. 또한 이 WFP를 적용한 MEDD (WFP-MEDD)를 제작하여 성능실험을 수행하여 WP-MEDD와 담수 생산량 비교를 통하여 성능을 평가하였다.

Fig. 1 Schematic diagram of MEDDs (a) wick-plate MEDD (b) wick-free plate MEDD

2. 실험방법

2.1 실험 장치

Table 1은 기존 WFP와 새롭게 제작된 WFP의 사양을 보여준다. 기존 WFP는 STS316L 금속판에 에칭 가공을 통해 식각하는 방식으로 가로로 평행한 다수의 홈을 만들었다. 새로 제작한 WFP는 홈 형상을 구현하면서 단가를 낮추기 위해 알루미늄 압출 공정을 이용하였다. 또한 Table 1의 그림과 같이 홈의 치수는 기존과 동일하나, 형상은 돌출부가 윗방향으로 꺾여 있어 설치 경사도를 10° 더 낮출 수 있도록 하였다. 이 때, 설치 경사도는 MEDD와 지면사이의 각도로, 수직을 기준으로 각도를 낮출수록 MEDD에 흡수되는 태양복사에너지는 증가하게 된다. 알루미늄은 내식성이 좋지 않기 때문에 압출 공정 후 아노다이징 처리를 통해 내식성을 향상시켰다. 새로 제작한 WFP는 기존 WFP보다 제작 비용을 77% 절감할 수 있으며, 약 14배 높은 열전도도는 장치 작동 온도를 증가시켜 성능 향상에 기여한다.

Table 1 Specification of wick-free plate

List	Wick-free plate	
	Existing type	Improved type
Processing method	Etching	Extrusion
Material	STS316L	Aluminum
Shape of grooves - side view
Production cost of plate (W/m^2)	300,000	70,000
Minimum inclination angle ($^\circ$)	70	60
Thermal conductivity (W/m^2)	16.5	237

제작된 WFP를 대상으로 담수생산 성능을 비교하기 위하여 Fig. 2와 같이 3중 효용단을 구성하여, WP-MEDD와 비교실험을 수행하였다. WFP와 WP는 폭 0.2 m, 높이 0.4 m로 제작되었으며, 면적은 0.08 m^2 이다. WP의 경우, 천과 STS316L 평판을 열접착시트를 이용하여 접착하여 제작하였다. Fig. 2와 같이 첫 번째 WP 혹은 WFP의 전면에 면히터를 부착하고 열손실을 줄이기 위하여 단열재(글라스울)를 부착하였다. 또한, 각 효용단의 가장 자리에 5 mm 두께의 실리콘고무를 부착하여 3중으로 결합할 때 확산 간격을 일정하게 유지시켰다. 장치 제작 시 Fig. 2와 같이 총 7개의 T type 열전대를 설치하여 첫 번째 효용단의 증발면, 마지막 효용단의 응축면과 외면, 면히터, 단열재의 정중앙부 온도와 소금물 공급 온도 및 주위 온도를 측정할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 WFP와 완성된 실험 장치의 모습은 Fig. 3에 나타나있다.

연동식정량펌프로 MEDD 상부에 소금물을 공급한 후, 직류전원공급장치(다우나노텍, DADP-20010)로 전기히터에 전압을 인가하여 평판을 가열한다. 이 때 평판을 따라 흐르는 소금물이 60-80℃로 가열되면서 자연 증발 후 확산되고 다음 단 전면에서 응축되어 흘러내려 각 단 하부의 집수유로를 타고 집수통에 수집된다. 집수통의 담수는 질량계(AND, CB-3000)를 이용하여 측정되고, DAQ를 통해 실시간으로 데이터를 수집한다. 실험이 종료되면 염도계(CAS, SALT-FREE 2500)로 담수의 염도를 측정하여 수질을 확인한다.

Fig. 2 Schematic diagram of performance experiment for three-effect MEDD

Fig. 3 Photos (a) Aluminum extruded WFP (b) Experimental setup

2.2 실험 조건

Table 2는 실험 조건을 보여주고 있다. 실험 시 설치 경사도는 90° , 주위온도는 25°C , 해수 공급온도는 25°C , 습도는 55%로 유지하였다. 또한 하지의 태양복사조건을 모사하기 위해 Fig. 4와 같이 약 14시간 동안 총 11.7 MJ/m^2 의 열량¹⁴⁾을 담수기에 공급하였다. 이 때, 공급 열량은 열손실을 제외한 담수기에 흡수되는 열량을 의미하며, 면히터로 공급된 전압과 전류를 곱하여 얻을 수 있다. 공급수(소금물)는 수돗물에 소금을 첨가하여 만들었으며, 염도는 3.5%이다. 공급 유량의 경우, 생산량에 영향을 미치는 인자이기 때문에 실험 변수로 설정하였으며, 최대 생산량을 보이는 최적 유량 값을 찾기 위하여 다섯 차례 유량을 변경하여 실험을 수행하였다.

Table 2 Experimental condition

Parameters	Value (s)
Ambient temperature ($^\circ\text{C}$)	25
Feed water temperature ($^\circ\text{C}$)	25
Humidity (%)	55
Inclination angle ($^\circ$)	90
Feed heat flux ($\text{MJ/m}^2\cdot\text{d}$)	11.7
Feed flow rate ($\text{ml/min}\cdot\text{m}^2$)	4.4 – 9.9
Salinity of feed water (%)	3.5

Fig. 4 Graph on absorbed energy to 1st plate and temperature of 1st evaporation surface

3. 실험 결과 및 논의

3.1 태양열 해수담수기 성능 비교

두 담수기의 성능 비교를 위해 담수 생산량의 결과를 서로 비교 하였다. 여기서 생산량은 단위 집열면적 당 담수량을 의미하는데 집열면적은 0.08 m^2 으로 평판의 크기와 동일하다. 모든 실험에서 생산된 담수에 대해 염도 측정 결과, 염분이 전혀 검출되지 않았다.

Fig. 5는 공급 유량에 따른 담수 생산량을 보여주고 있다. 두 MEDD 모두 유량이 증가할수록 생산량이 증가하다가 일정 유량이 지나면 감소하는 경향을 보인다. 또한 유량에 관계없이 새로운 WFP-MEDD가 기존 WP-MEDD 보다 높은 생산량을 보이는데, 최대 담수 생산량의 경우에는 WFP-MEDD가 $4.60 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 로 WP-MEDD의 $4.48 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 보다 약 3% 높다. 이 때, 공급 유량 조건은 WFP-MEDD의 경우 $7.9 \text{ ml}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$, WP-MEDD는 $7.2 \text{ ml}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 로 WFP-MEDD의 최적 공급 유량이 더 높다. WFP가 WP보다 열전도도가 우수하기 때문에 각 효용단의 열저항이 감소하여, 더 높은 온도 조건에서 작동했기 때문에 생산량이 증가한 것으로 판단된다. 한편, WFP-MEDD는 WP-MEDD에 비해 최대생산량과 유사한 양의 담수를 생산할 수 있는 공급유량의 범위가 넓다. 이는 유량에 따른 생산량 변동성이 작다는 것을 의미한다. 실제 현장에서 해수담수기 운전 시 다양한 이유로 발생하는 공급유량의 변동과 최적 공급유량 제어의 어려움 등을 고려하였을 때, 주목할 만한 특성이다.

Fig. 5 Productivity with feed flow rate of MEDDs

Fig. 6은 WFP-MEDD와 WP-MEDD가 최대 생산량을 보인 유량에서 시간에 따른 누적 생산량을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 초기 공급 열량이 낮을 때에는 WFP-MEDD의 담수 생산량이 WP-MEDD보다

낮지만, 공급 열량이 증가할수록 생산량이 가파르게 증가하여 비슷하게 유지된다. 그런데 다시 공급 열량이 줄어드는 구간에서 WFP-MEDD는 좀 더 오랫동안 담수를 생산하는 것을 알 수 있다. 특히, WP-MEDD의 경우 마지막 2시간동안은 담수가 생산되지 않았다. 이는 WFP-MEDD의 열용량이 WP-MEDD보다 약 6.2배 높기 때문이다.

Fig. 6 Accumulated production of MEDDs

얻어진 생산량으로부터 MEDD의 열효율을 비교하기 위해 성능 지수(PR, Performance ratio)를 계산하였다. 일반적으로 태양열 증류기의 PR은 아래 식으로부터 구해진다¹⁴⁾.

$$PR = \frac{m \times h_{latent}}{Q} = \frac{m \times h_{latent}}{\int V I dt} \quad (1)$$

식(1)의 m 은 담수생산량, h_{latent} 은 증발잠열, Q 는 공급열량이다. 위 식을 통해 실험한 유량 범위에서 WP-MEDD와 WFP-MEDD의 PR을 구하면, 각각 0.79–0.86, 0.83–0.89이다. 최적 생산량일 때의 PR은 WFP-MEDD가 WP-MEDD보다 3% 더 높았다.

3.2 불확도 분석

실험 장비로부터 얻은 값에 대한 불확도는 type B 표준불확도(u)를 이용하여 구할 수 있으며, 수식은 아래와 같다¹⁵⁾.

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

식(2)의 a 는 실험 장비의 정확도이다. Table 3은 실험에 사용된 실험 장비의 정확도 및 표준불확도를 보여준다.

한편, 성능 비교를 위해 3.1절에서 도입한 PR 에 대한 합성표준불확도를 구하기 위해 Kline and McClintock¹⁶⁾에 의해 제안된 식(3)을 활용하였다. PR 은 공급열량과 담수생산량으로부터 구해지며, 합성표준불확도는 식(4)를 이용하여 구할 수 있다. 이 식에 의해 계산된 PR 의 최대 합성불확도는 0.03%이다.

$$u_c^2(f) = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \right], f = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} u_c(PR) &= \left[\left(\frac{\partial PR}{\partial m} u(m) \right)^2 + \left(\frac{\partial PR}{\partial V} u(V) \right)^2 + \left(\frac{\partial PR}{\partial I} u(I) \right)^2 \right]^{0.5} \\ &= PR \left[\left(\frac{u(m)}{\partial m} \right)^2 + \left(\frac{u(V)}{\partial V} \right)^2 + \left(\frac{u(I)}{\partial I} \right)^2 \right]^{0.5} \end{aligned} \quad (4)$$

Table 3 Measuring range, accuracy, and standard uncertainty of experimental devices

Experimental devices	Measuring range	Accuracy	Standard uncertainty
DC power supply	V : 0 – 60 V	V : 5 mV	V : 2.887 mV
	I : 0 – 3 A	I : 0.5 mA	I : 0.289 mA
Electric scale	0 – 3 kg	0.05 g	0.029 g

4. 결론

기존 연구에서는 다중효용확산태양열증류기(MEDD)의 핵심 부품인 외을 대체하기 위해 에칭(etching) 가공을 이용하여 평판의 표면에 반복되는 홈 패턴을 적용한 WFP를 개발하였다. 그러나 에칭가공은 상대적으로 비싸고, 제작 크기의 한계 때문에 상용화가 어렵다는 단점이 있었다. 또한 에칭 가공된 평판은 설치 경사도에 제약이 있어 태양에너지의 흡수량을 크게 증가시킬 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 이를 개선하기 위해 홈의 형상이 개선된 알루미늄 압출방식의 WFP를 평가하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 담수 생산성을 향상시킬 수 있는 다중효용확산태양열 증류기용 WFP를 개발하였다. 개발된 WFP가 적용된 MEDD는 기존 WP-MEDD보다 약 3% 생산량이 높다.
- (2) WFP-MEDD는 WP-MEDD에 비해 공급 유량에 따른 생산량 변화폭이 적다. 이는 실제 현장에서 발생하는 공급유량의 변동성 및 최적 공급 유량 조절의 어려움 등에도 WFP-MEDD는 더 안정적으로 담수를 생산할 수 있는 것을 의미한다. 상용화 시 WFP-MEDD의 생산량에 대한 안정성은 주목할 만한 특성이다.
- (3) MEDD는 해수공급유량에 따라 생산량이 변화되며 최대 생산량을 갖는 유량이 존재한다. 각 담수기의 최적 유량은 11.7 MJ/m^2 의 열량 공급 조건에서 WFP-MEDD의 경우 $7.9 \text{ ml}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$, WP-MEDD는 $7.2 \text{ ml}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 이다.
- (4) 새로 개발된 WFP의 제작 단가($70,000 \text{ W/m}^2$)는 에칭가공법을 적용한 평판보다 77% 낮음에도 불구하고 여전히 기존 WP의 제작 단가(약 $10,000 \text{ W/m}^2$)보다 7배 높다. 태양열 담수기 시장에서의 가격 경쟁력을 고려하면 제작단가를 더욱 낮추기 위한 추가 연구가 필요하다.

후기

본 연구는 2019년도 및 2020년도 산업자원통상부의 재원으로 에너지기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(과제번호 : 20173030083420, 20203040010240).

REFERENCES

1. Hameeteman, E., Future Water (In) Security: Facts, Figures, and Predictions Acknowledgments, Glob. Water Inst., 2013.
2. World Health Organization (WHO) and Water Engineering Development Centre (WEDC), Technical Notes on Drinking Water, Sanitation and Hygiene in Emergencies : 9. How Much Water is Needed in Emergencies, The United Nations World Water Development Report, 2018.
3. Cooper, P. I., The Maximum Efficiency of Single-effect Solar Stills, Sol. Energy, Vol. 15, No. 3, pp. 205-217, 1973.
4. Jamil, B. and Akhtar, N., Effect of Specific Height on the Performance of a Single Slope Solar Still: An Experimental Study, Desalination, Vol. 414, pp. 73-88, 2017.
5. Telkes, M., Solar Still Construction, Office of Saline Water Research and Development Progress Report, No. 33, New York Univ., NY (USA), 1959.
6. Ouahes, R., Ouahes, C., Le Goff, P., and Le Goff, J., A Hardy, High-yield Solar Distiller of Brackish Water, Desalination, Vol. 67, No. C, pp. 43-52, 1987.
7. Tanaka, H., Nosoko, T., and Nagata, T., A Highly Productive Basin-type-multiple-effect Coupled Solar Still, Desalination, Vol. 130, pp. 279-293, 2000.
8. Huang, B. J., Chong, T. L., Wu, P. H., Dai, H. Y., and Kao, Y. C., Spiral Multiple-effect Diffusion Solar Still Coupled with Vacuum-tube Collector and Heat Pipe, Desalination, Vol. 362, pp. 74-83, 2015.
9. Park, C. D., Lim, B. J., Noh, Y. D., Lee, S. S., and Chung, K. Y., Parametric Performance Test of Distiller

- Utilizing Solar and Waste Heat, *Desalin. Water Treat.*, Vol. 55, No. 12, pp. 3303-3309, 2015.
10. Yeo, S. D., Lim, B. J., Lee, G. R., and Park, C. D., Experimental Study of Effects of Different Heat Sources on the Performance of the Hybrid Multiple-effect Diffusion Solar Still, *Sol. Energy*, Vol. 193, pp. 324-334, 2019.
 11. Chong, T. L., Huang, B. J., Wu, P. H., and Kao, Y. C., Multiple-effect Diffusion Solar Still Coupled with a Vacuum-tube Collector and Heat Pipe, *Desalination*, Vol. 347, pp. 66-76, 2014.
 12. Xie, G., Xiong, J., Liu, H., Xu, B., Zheng, H., and Yang, Y., Experimental and Numerical Investigation on a Novel Solar Still with Vertical Ripple Surface, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 98, pp. 151-160, 2015.
 13. Lee, G. R., Ajiwiguna, T. A., Lim, B. J., and Park, C. D., Development of Integrated Effect Plate for Performance Improvement of Multi-effect Diffusion Solar Still, *Desalin. Water Treat.*, Vol. 183, pp. 73-80, 2020.
 14. Lim, B. J., Yu, S. S., Chung, K. Y., and Park, C. D., Numerical Analysis of the Performance of a Tilttable Multi-effect Solar Distiller, *Desalination*, Vol. 435, pp. 23-34, 2018.
 15. Kirkup, L. and Frenkel, R., *An Introduction to Uncertainty in Measurement Using the GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)*, Cambridge University Press, 1ed., 2006.
 16. Kline, S. J. and McClintock, F. A., Describing Uncertainties in Single Sample Experiments, *Mech. Eng.*, pp. 3-9, 1953.